



**Octubre 2009**

**I SIMPOSIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

# **GENERADOR DE INDUCCIÓN AUTOEXCITADO CON CAPACITOR SHUNT Y AUTOREGULADO CON CAPACITOR SERIE PARA UTILIZACIÓN EN PLANTAS AUTÓNOMAS DE GENERACIÓN EÓLICA**

**Roberto Ramírez A.  
Comité de Operación Económica del Sistema  
Universidad Nacional de Ingeniería**



# I. INTRODUCCION

Los motores primos que se utilizan para impulsar la máquina de inducción como generador, pueden ser de velocidad constante o de velocidad variable.

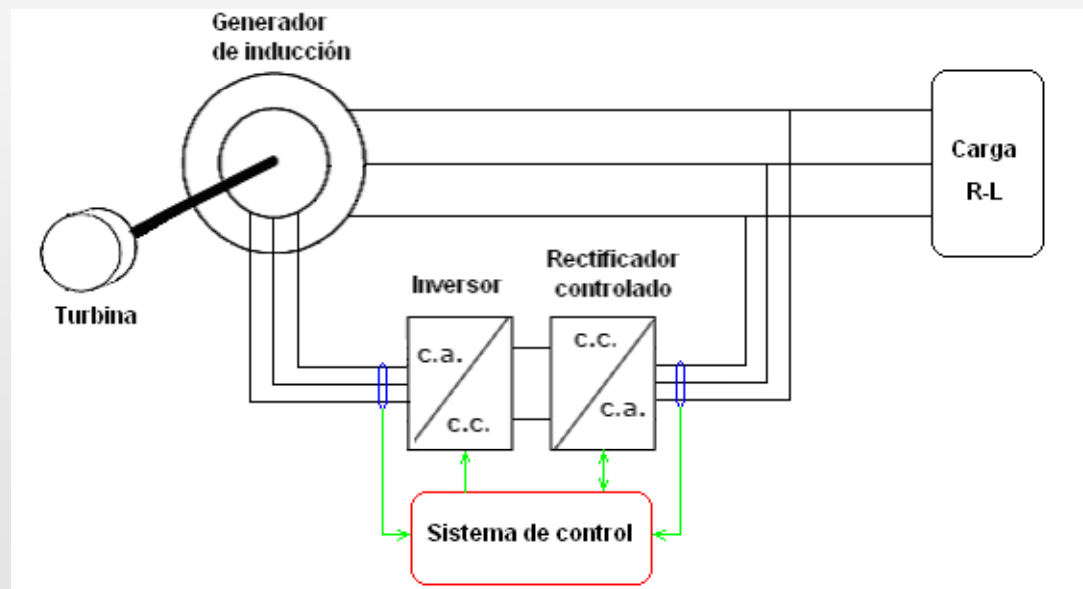
El grupo Motor Primo-Generador puede estar cerca a la red o en lugares aislados.

Para captar la máxima energía posible de las fuentes de energía en lugares aislados (hidráulicas, eólicas y otras), es necesario permitir que las micro-centrales funcionen a velocidad variable.

Para regular la frecuencia y tensión no es posible utilizar la red de distribución, sin embargo la energía generada en forma aislada debe poseer una cierta calidad para su consumo.

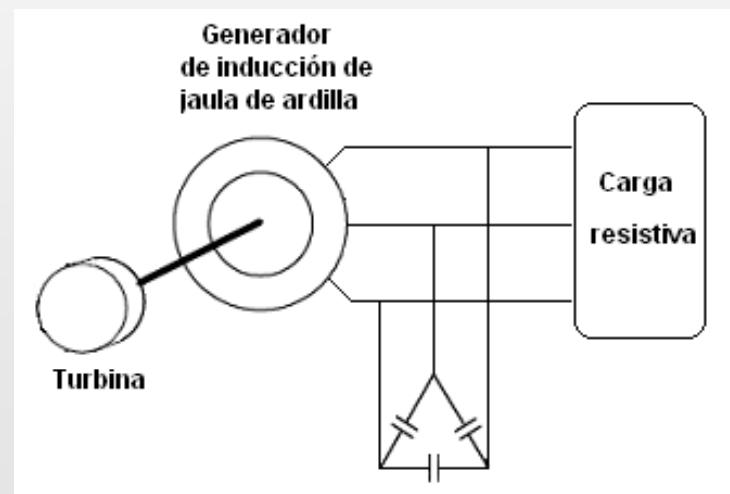


Se muestra una estructura aislada de generación con un generador de inducción (de rotor bobinado) con doble alimentación impulsado a velocidad variable, que utiliza un sistema de control para mantener frecuencia constante en la carga.



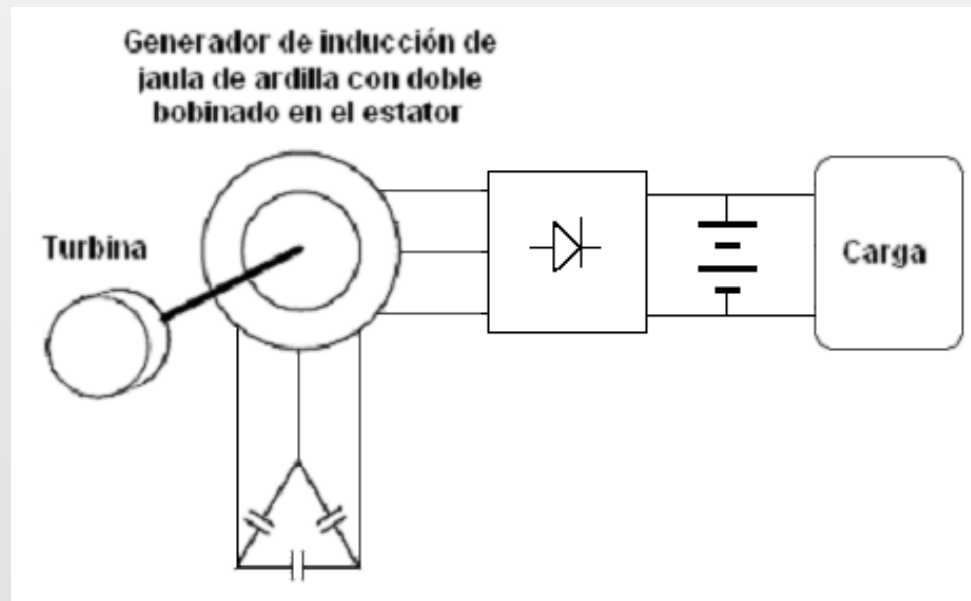


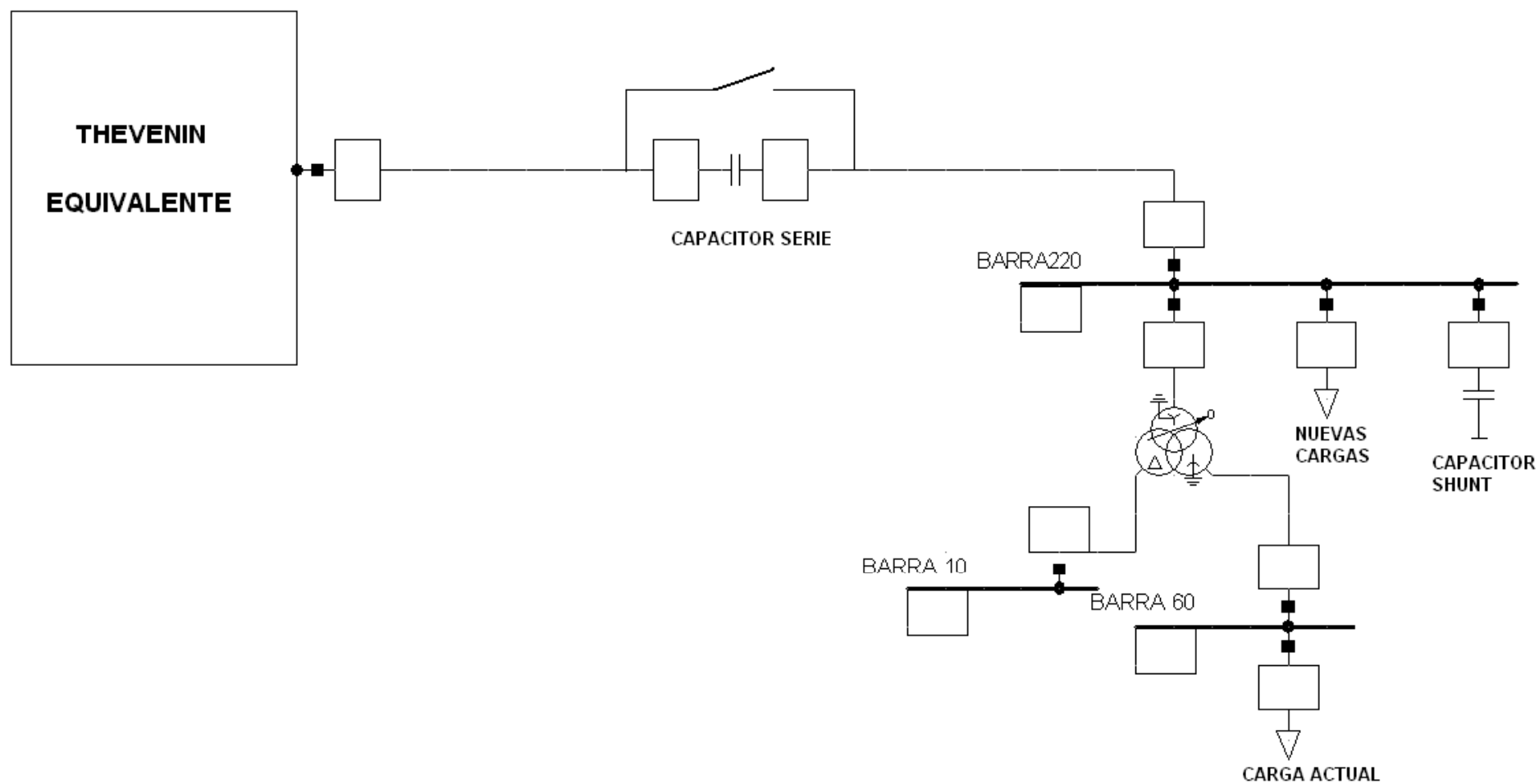
Se muestra una estructura de generación del tipo autoexcitada que utiliza una máquina de inducción de jaula de ardilla, que a pesar de ser más simple y de menor costo que una de rotor bobinado de similar potencia, requiere menor mantenimiento, es más robusta y presenta mayor confiabilidad de operación.

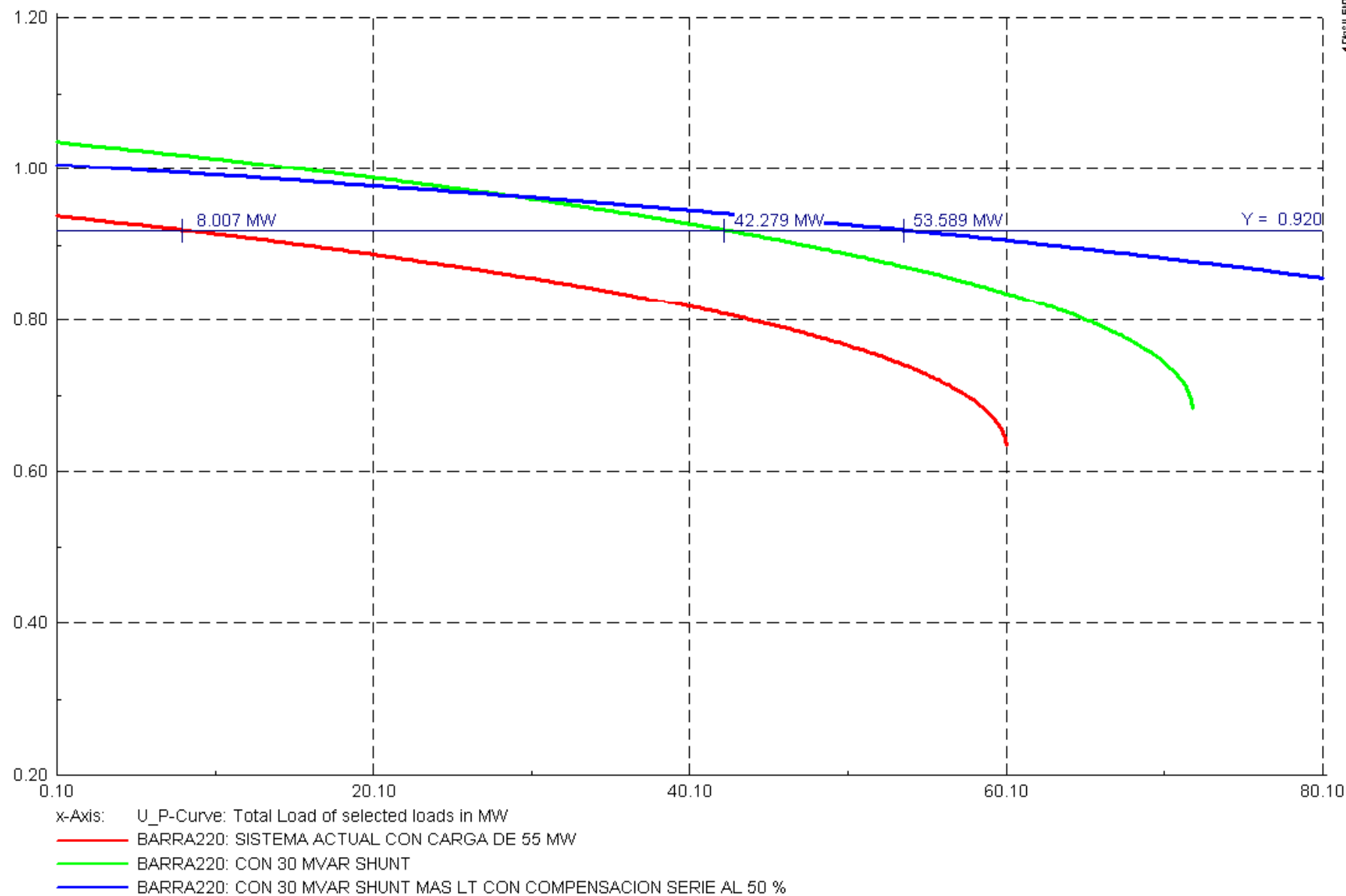




En 1981 se desarrolló y verificó experimentalmente un modelo de Generador de Inducción Autoexcitado, para aplicarlo a la verificación del diseño de generadores de inducción destinados a plantas eólicas. Resultó adecuado utilizar un bobinado independiente de mayor tensión para la conexión de los capacitores de excitación. Mientras que el bobinado de menor tensión entregaba potencia por medio de un sistema de rectificación a un banco de baterías de 12 o 24 voltios.







CURVA DE CAPABILIDAD DE BARRA 220

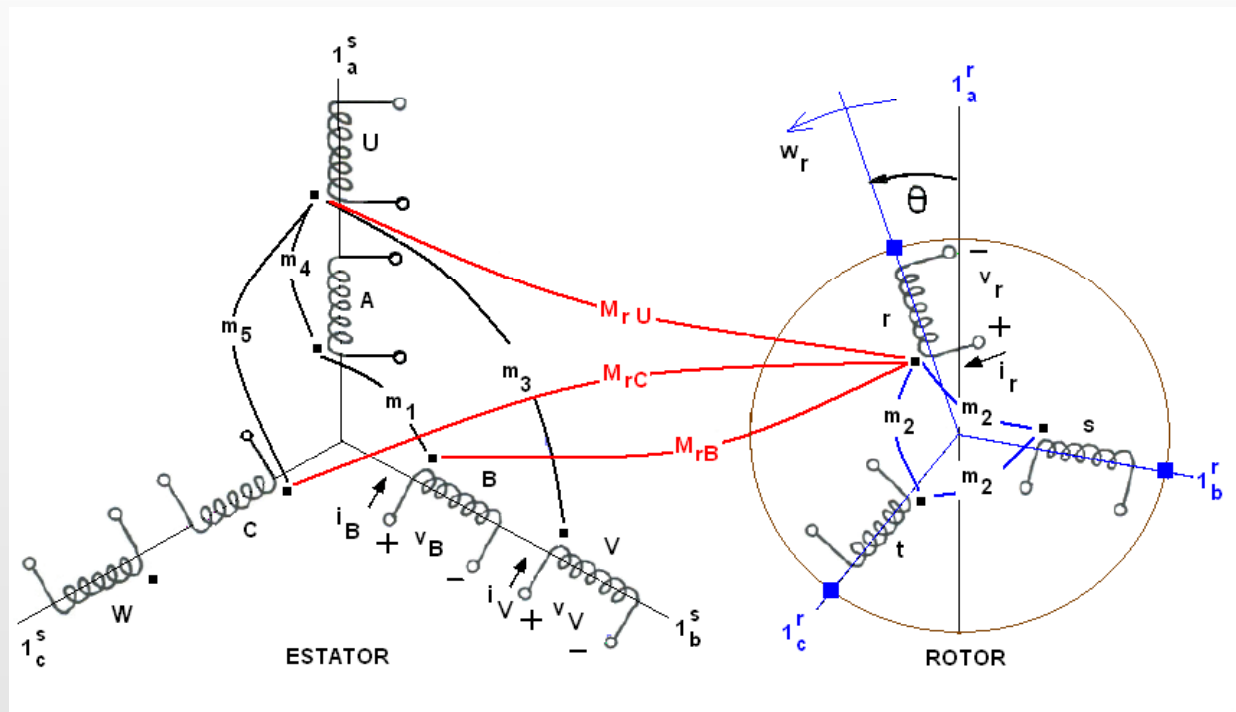
U\_P-Curve

Date: 10/30/2009

Annex: /1



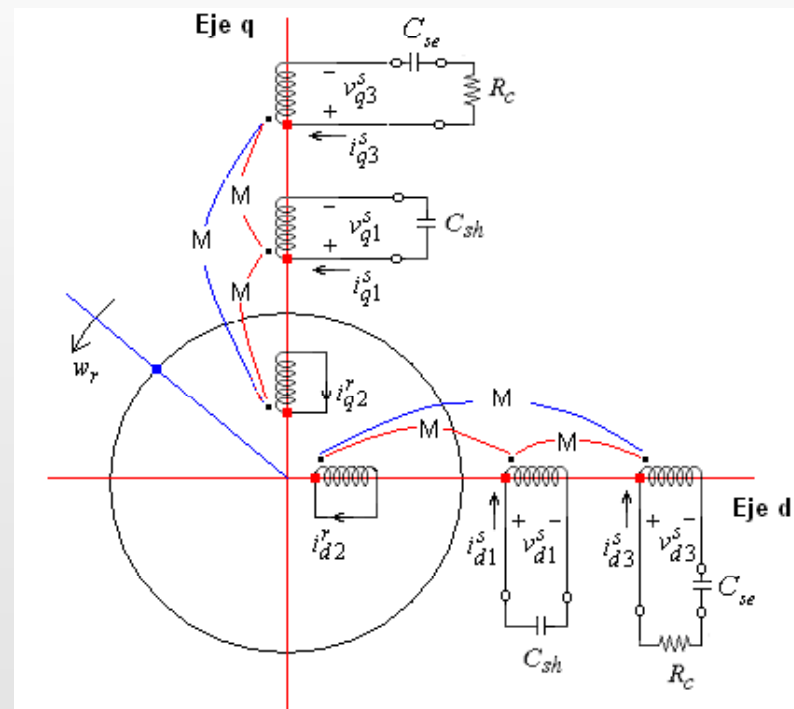
## II. MODELO MATEMATICO





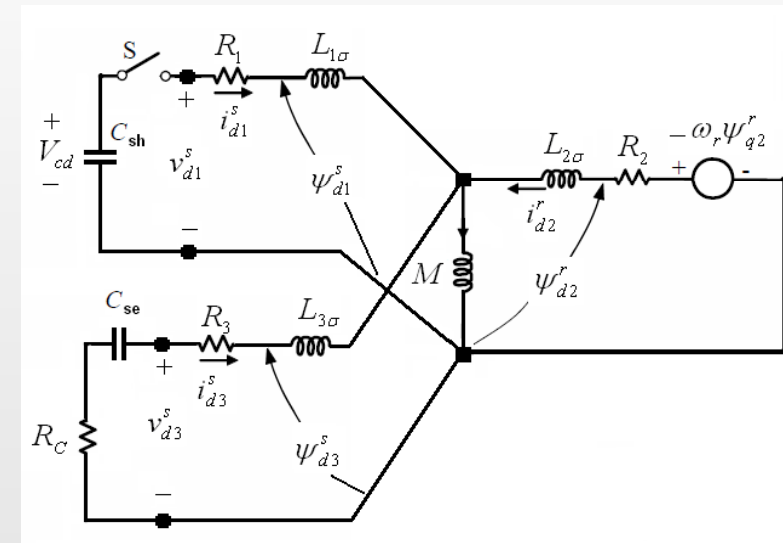
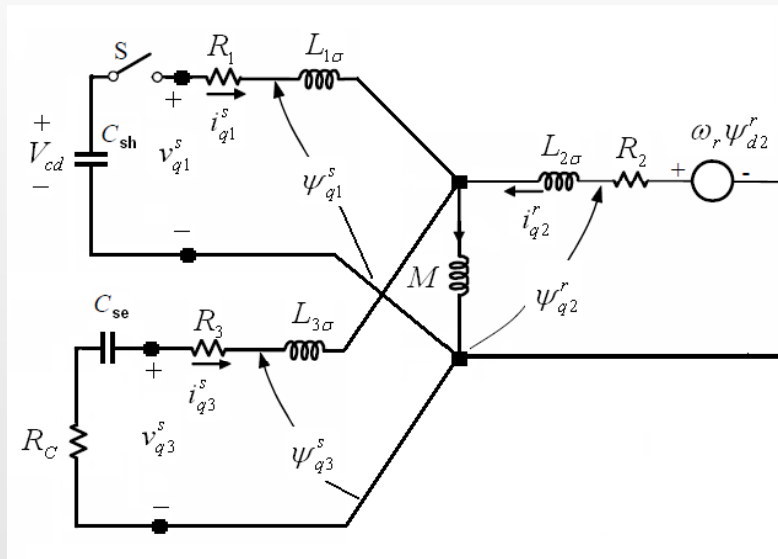


Modelo d-q del GIADBE reflejado al bobinado de excitación incluyendo los capacitores de excitación *shunt*, la resistencia de carga y los capacitores serie.





Las ecuaciones diferenciales y algebraicas del modelo pueden ser expresadas mediante los circuitos equivalentes en los ejes d y q.





## ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES ALGEBRAICO-DIFERENCIALES

Las ecuaciones son despejadas en la forma requerida para efectuar las simulaciones mediante el Toolbox Simulink de Matlab.

$$p\psi_{q1}^s = v_{q1}^s - R_1 i_{q1}^s$$

$$p\psi_{d1}^s = v_{d1}^s - R_1 i_{d1}^s$$

$$p\psi_{q3}^s = v_{q3}^s - R_3 i_{q3}^s$$

$$p\psi_{d3}^s = v_{d3}^s - R_3 i_{d3}^s$$

$$p\psi_{q2}^r = -R_2 i_{q2}^r + \omega_r \psi_{d2}^r$$

$$p\psi_{d2}^r = -R_2 i_{d2}^r - \omega_r \psi_{q2}^r$$

$$\psi_{qm} = \psi_{q1}^s - L_{1\sigma} i_{q1}^s$$

$$\psi_{dm} = \psi_{d1}^s - L_{1\sigma} i_{d1}^s$$

$$\psi_m = \sqrt{\psi_{qm}^2 + \psi_{dm}^2}$$

$$1/M = a_0 + a_1 \psi_m + a_2 \psi_m^2$$

$$i_{q1}^s = 1/M \psi_{qm} - (i_{q3}^s + i_{q2}^r)$$

$$i_{d1}^s = 1/M \psi_{dm} - (i_{d3}^s + i_{d2}^r)$$

$$i_{q3}^s = 1/L_{3\sigma} (\psi_{q3}^s - \psi_{qm})$$

$$i_{d3}^s = 1/L_{3\sigma} (\psi_{d3}^s - \psi_{dm})$$

$$i_{q2}^r = 1/L_{2\sigma} (\psi_{q2}^r - \psi_{qm})$$

$$i_{d2}^r = 1/L_{2\sigma} (\psi_{d2}^r - \psi_{dm})$$

$$v_{q1}^s = -\frac{1}{pC_{sh}} i_{q1}^s$$

$$v_{d1}^s = -\frac{1}{pC_{sh}} i_{d1}^s$$

$$v_{q3}^s = -\frac{1}{pC_{se}} i_{q3}^s - R_C i_{q3}^s$$

$$v_{d3}^s = -\frac{1}{pC_{se}} i_{d3}^s - R_C i_{d3}^s$$



### III. IMPLEMENTACION DEL GIADBE

El Generador de Inducción Autoexcitado con Doble Bobinado en el Estator (GIADBE) se puede implementar en la Máquina Generalizada Mawdsley Student's Demonstration Set del Laboratorio de Electricidad de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Resistencias y reactancias de dispersión reflejadas al bobinado de excitación del estator:

$$R_1 = 5.684\Omega, L_{1\sigma} = 0.0530H$$

$$R_3 = 1.845\Omega, L_{3\sigma} = 0.01766H$$

$$R_2 = 3.663\Omega, L_{2\sigma} = 0.0030H$$

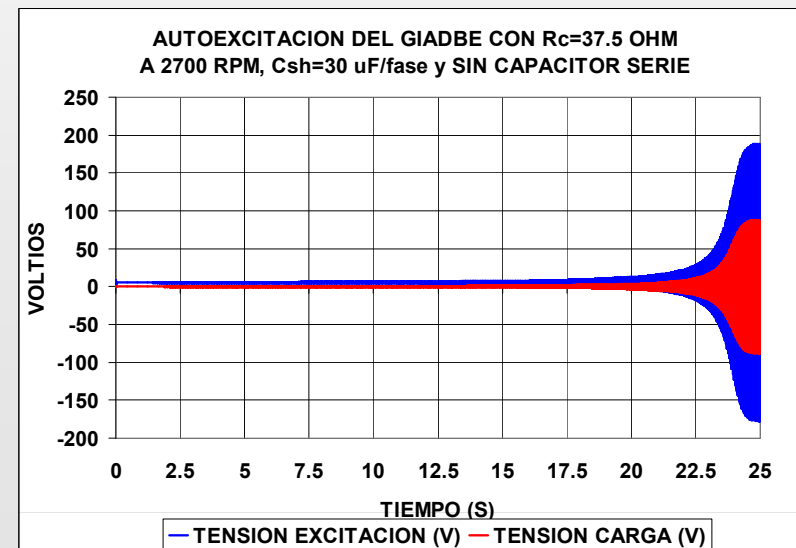
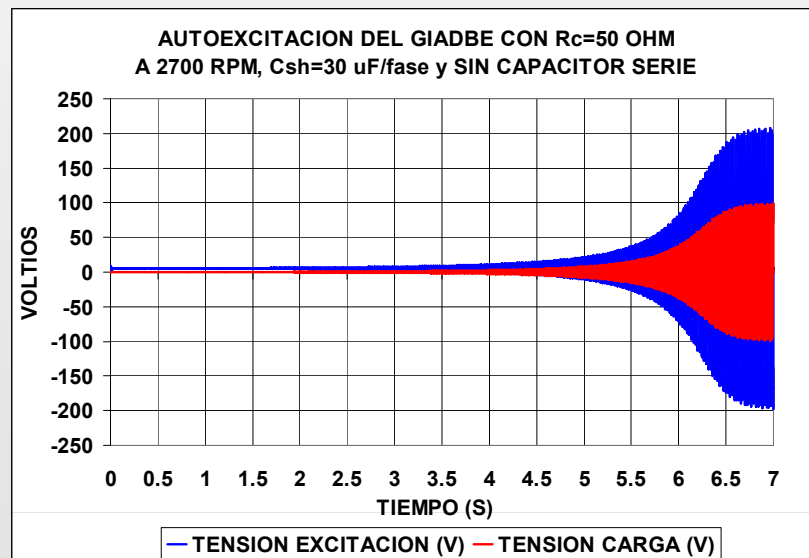
La saturación se modela mediante:  $1/M = a_0 + a_1 \Psi_m + a_2 \Psi_m^2$ .  
 $a_0=2.2136$ ,  $a_1=2.6353$  y  $a_2=4.5245$

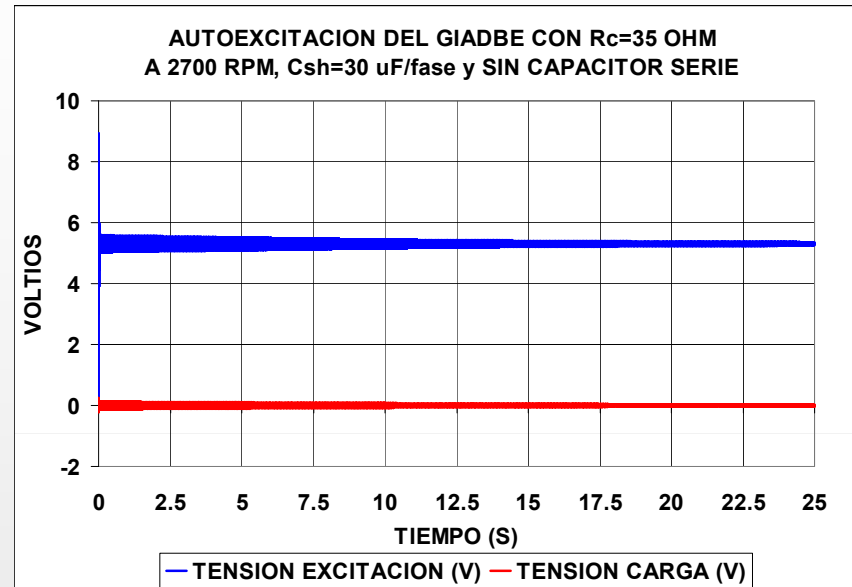


## IV. TRANSITORIOS EN EL GIADBE

### IV.1 AUTOEXCITACION CON CARGA RESISTIVA

Se impulsa el GI a una cierta velocidad (2700 rpm), con una carga resistiva en el bobinado de carga y luego se conecta (en el bobinado de excitación) un banco de capacitores de 30 uF/fase.



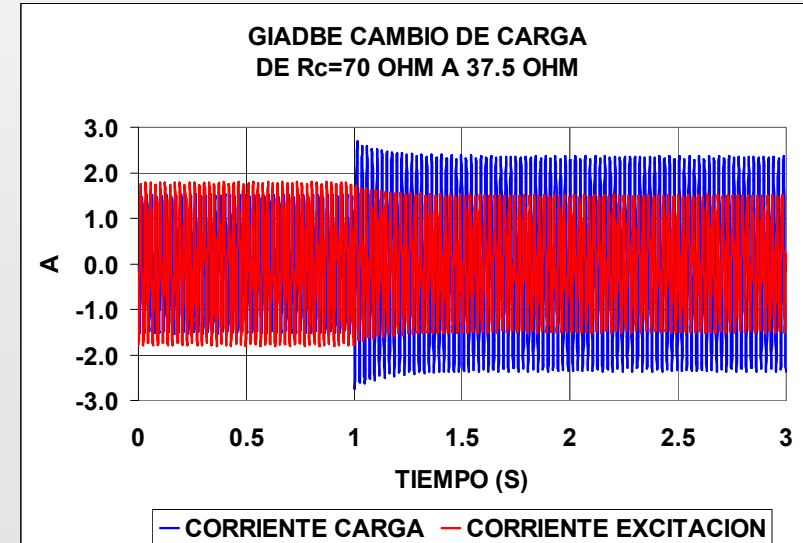
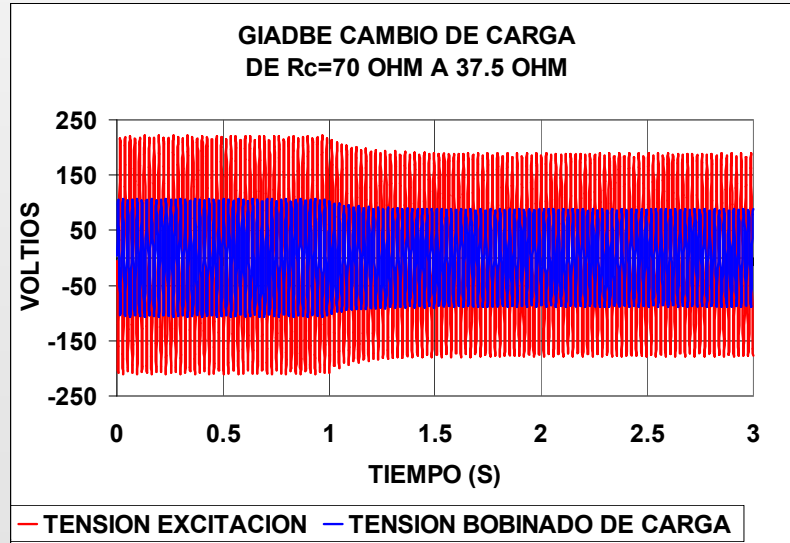


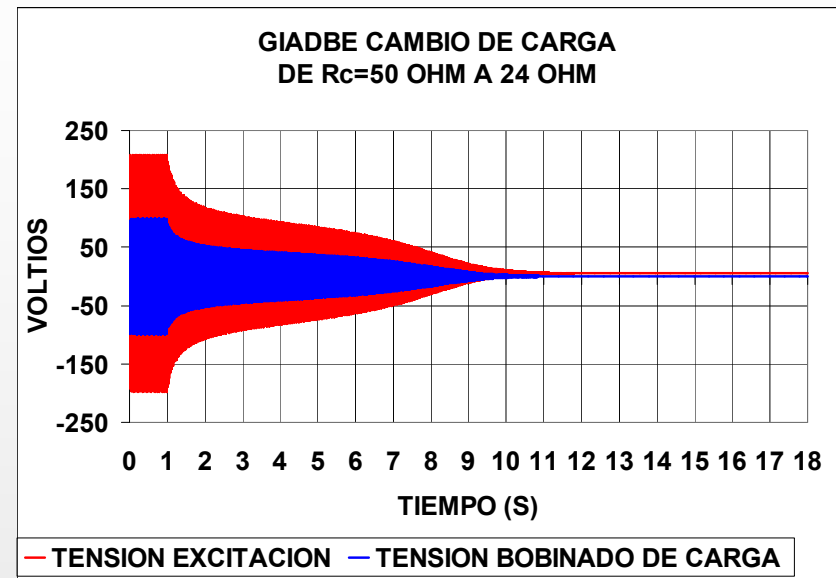
Para condiciones dadas de velocidad y capacitor *shunt*, existe un valor de resistencia de carga crítica, tal que con resistencias de carga menores a este valor no es posible la autoexcitación.



## IV.2 CAMBIOS BRUSCOS DE CARGA

Esta operando el GI con capacitores de 30  $\mu\text{F}$ /fase en el bobinado de excitación y con una carga resistiva en el bobinado de carga. Luego se cambia bruscamente la resistencia de carga.





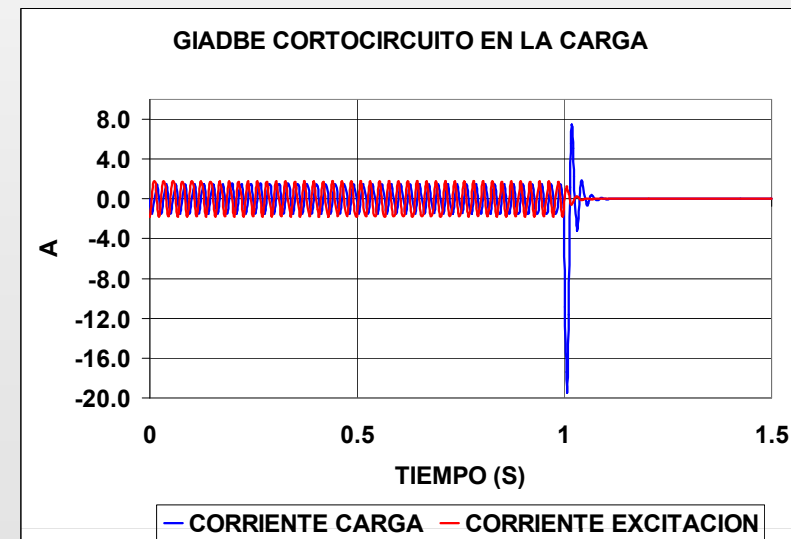
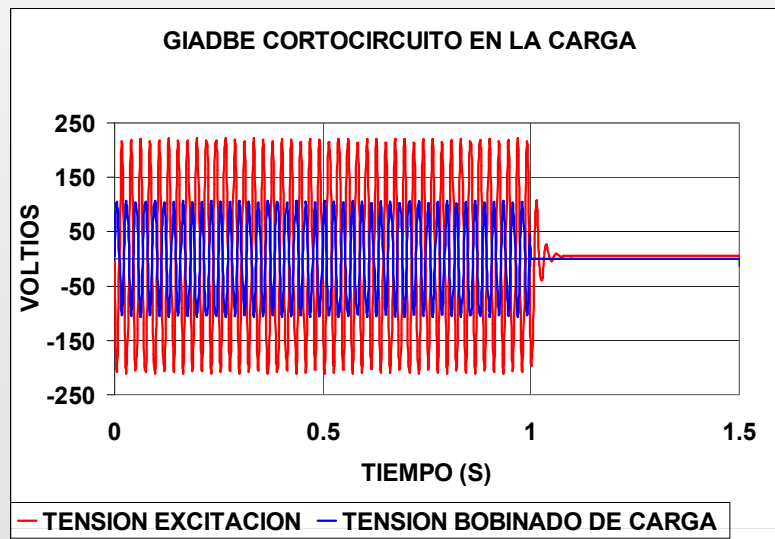
Existe un punto de colapso en la tensión y esta dado por la condición de carga cuya resistencia de carga es menor a la resistencia crítica.





## IV.3 CORTOCIRCUITO EN LA CARGA

Este comportamiento ante cortocircuitos puede ser considerado como una ventaja, sin embargo el GI se desexcita. Para re-excitarse después de este evento requiere que los capacitores de excitación sean cargados previamente.

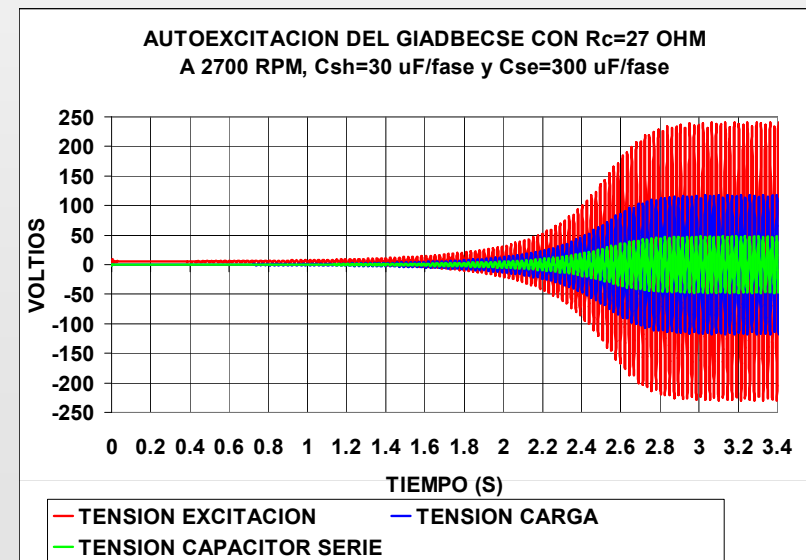
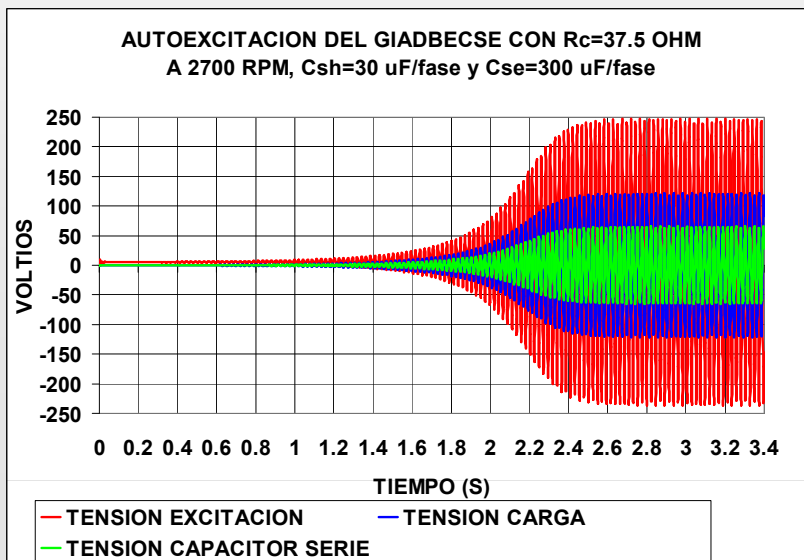




## V. TRANSITORIOS EN EL GIADBE CON CAPACITORES SERIE (GIADBECSE)

### V.1 AUTOEXCITACION CON CARGA RESISTIVA

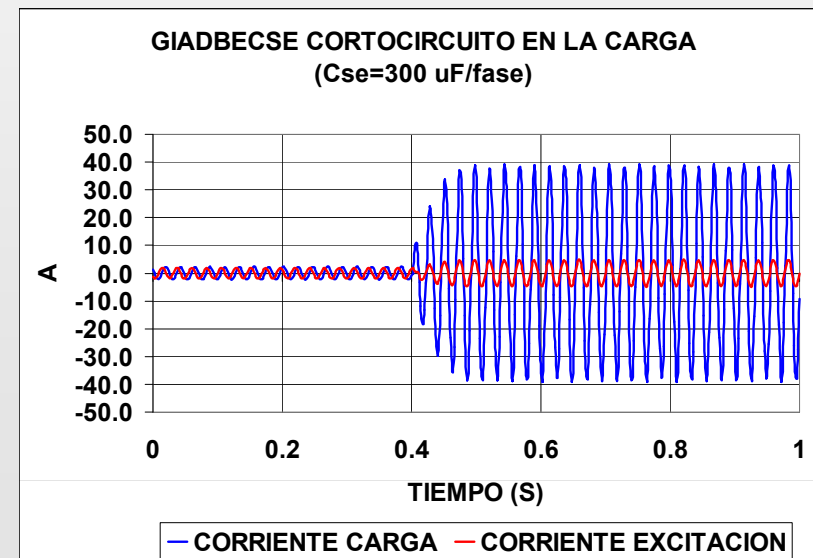
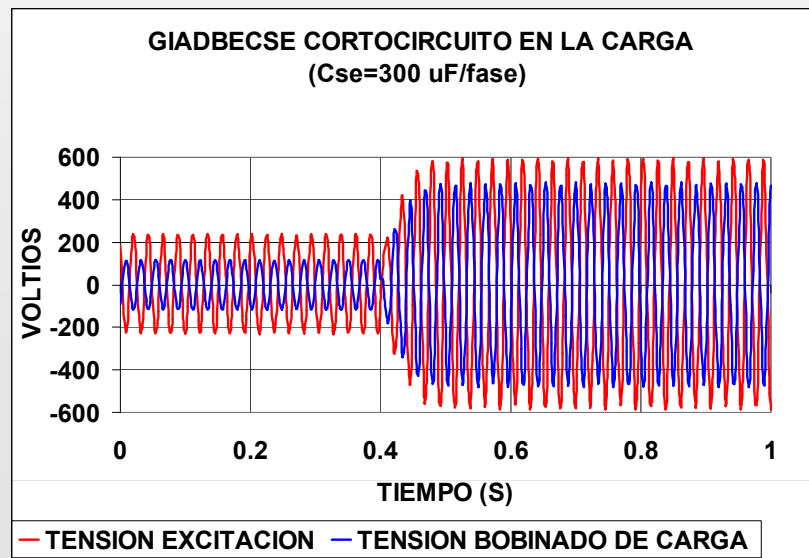
Al incorporar capacitores en serie con la carga, el GI puede autoexcitarse inclusive con resistencias de carga menores al valor crítico.





## V.2 CORTOCIRCUITO EN LA CARGA

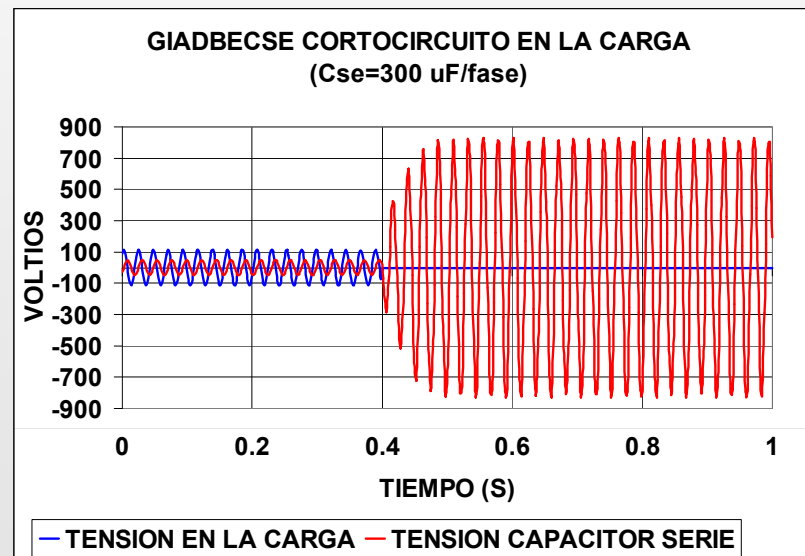
La tensión en el bobinado de excitación y la corriente en el capacitor serie se incrementan notablemente.





El GI no se desexcita.

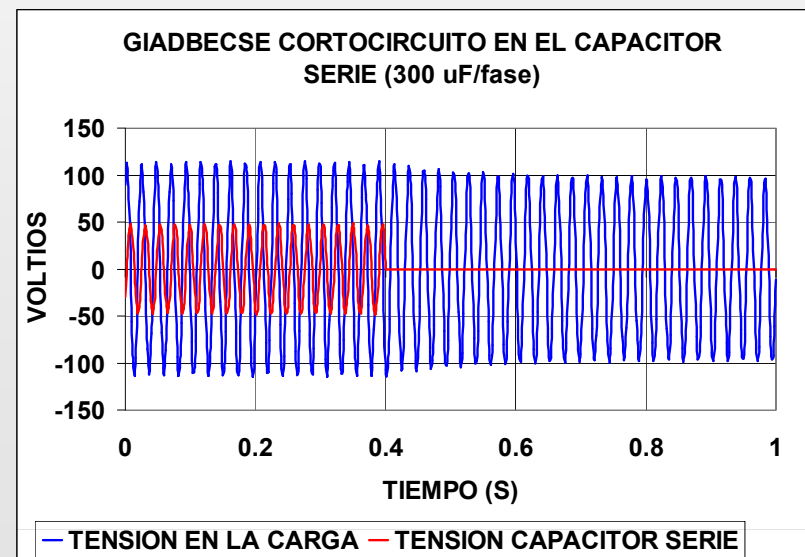
Ahora existe una corriente que alimenta la falla, que activará la protección de sobrecorriente del generador.





## V.3 CORTOCIRCUITO EN EL CAPACITOR SERIE

Si el GI esta operando con resistencias de carga mayores a la resistencia crítica podrá reponerse a los efectos de la pérdida de los capacitores serie, debido a un cortocircuito. Con una carga prefalla mayor (resistencia de carga menor a la critica) se desexcitará.

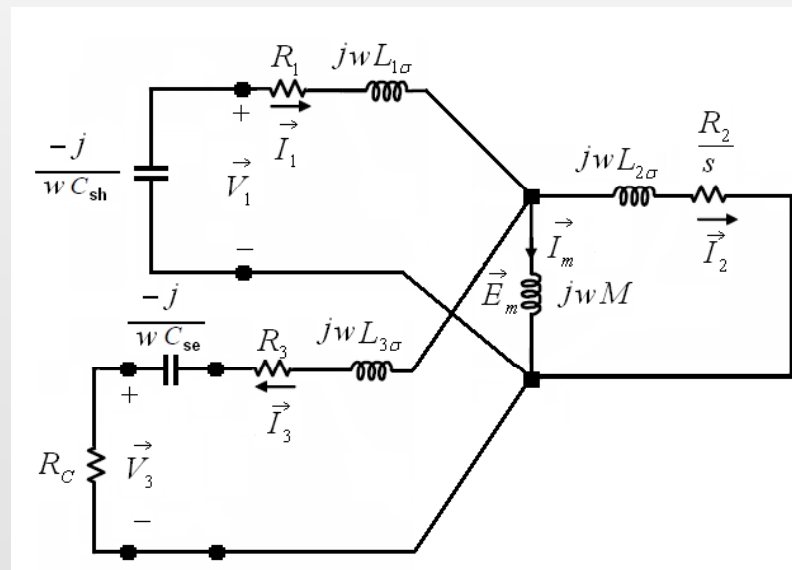




## VI. ESTADO ESTACIONARIO

### VI.1 ECUACIONES ALGEBRAICAS

Interpretando las ecuaciones se llega al circuito equivalente del GIA, en el cual aparece el capacitor en serie con la carga.





## VI.2 ESTRATEGIA DE SOLUCION

Se define las siguientes variables:

$$\vec{V}_1 = x_1 + jx_2$$

$$\vec{V}_3 = x_3 + jx_4$$

$$\vec{\psi}_m / \sqrt{2} = -jx_5$$

$$s = x_6$$

Las ecuaciones de estado estacionario:

$$0 = wR_1 C_{sh} x_2 + w^2 L_{1\sigma} C_{sh} x_1 - x_1 + wx_5$$

$$0 = -wR_1 C_{sh} x_1 + w^2 L_{1\sigma} C_{sh} x_2 - x_2$$

$$0 = R_3 x_3 / R_c - wL_{3\sigma} x_4 / R_c + x_3 + x_4 / (wC_{se} R_c) - wx_5$$

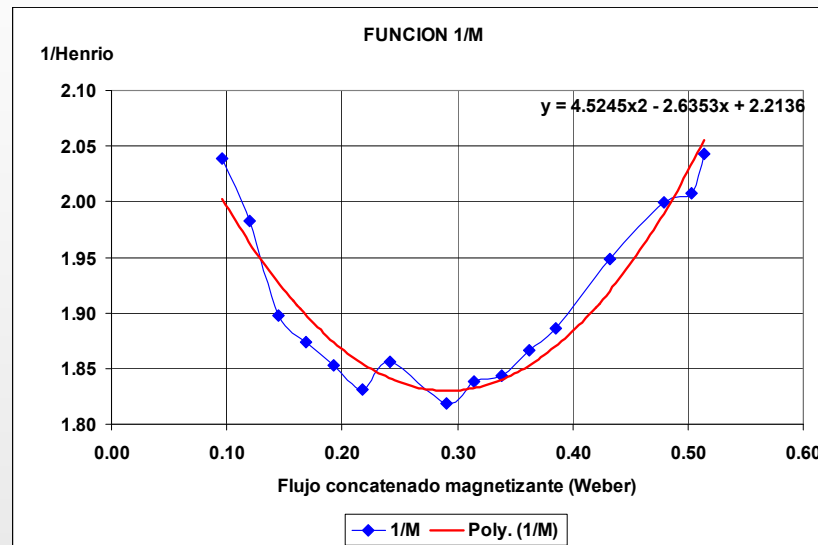
$$0 = R_3 x_4 / R_c + wL_{3\sigma} x_3 / R_c + x_4 - x_3 / (wC_{se} R_c)$$

$$0 = wC_{sh} x_2 - x_3 / R_c - \frac{wx_5 (R_2 / x_6)}{((R_2 / x_6)^2 + (wL_{2\sigma})^2)}$$

$$0 = -wC_{sh} x_1 + (1/M)x_5 - x_4 / R_c + \frac{w^2 x_5 (L_{2\sigma})}{((R_2 / x_6)^2 + (wL_{2\sigma})^2)}$$



$1/M$  es una función del flujo concatenado se ha expresado mediante la relación empírica  $1/M = a_0 + a_1 \Psi_m + a_2 \Psi_m^2$ .



Se tendrían 10 posibles incógnitas:  $R_c$ ,  $w_r$ ,  $C_{sh}$ ,  $C_{se}$ ,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ ,  $x_5$  y  $x_6$ . Un punto de operación, se define asignando valores a  $R_c$ ,  $w_r$ ,  $C_{sh}$ ,  $C_{se}$ . Para resolver las ecuaciones estado estacionario del GIADBECSE se utiliza el método de Newton-Raphson.

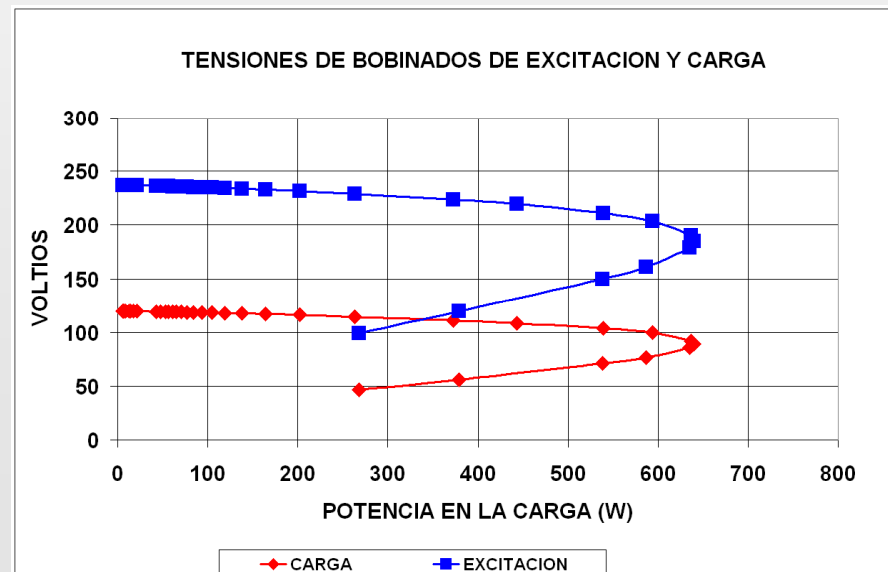




## VI.3 CARACTERISTICAS DEL GIABDE

Operando a una velocidad de 2700 rpm, con capacitores  $C_{sh}$  de 30  $\mu\text{F}$ /fase en el bobinado de excitación y suministrando potencia a una carga puramente resistiva variable.

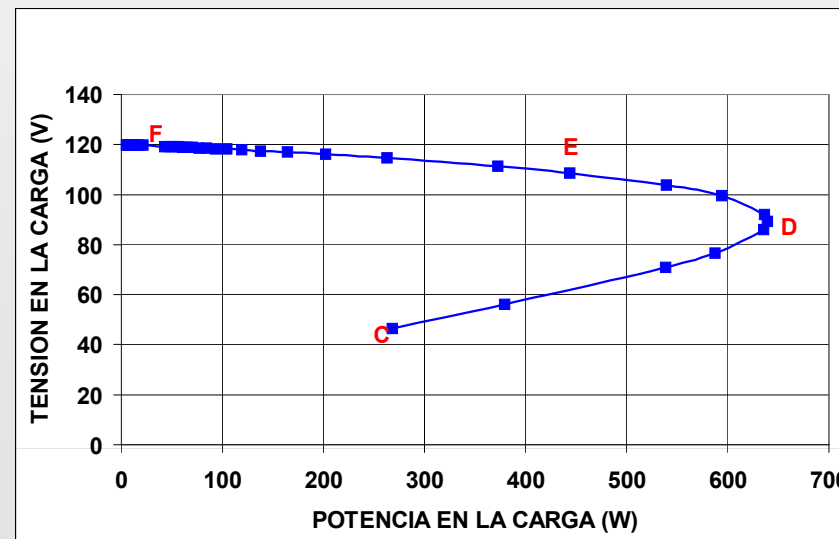
### VI.3.1 CARACTERISTICA P - V





En el camino de F hacia D, la pendiente de la tensión es negativa y se va incrementando en magnitud, hasta que en el punto D alcanza un valor negativo infinito. Esta condición crítica de operación que corresponde a la máxima potencia representa el límite de la operación satisfactoria del GIADBE.

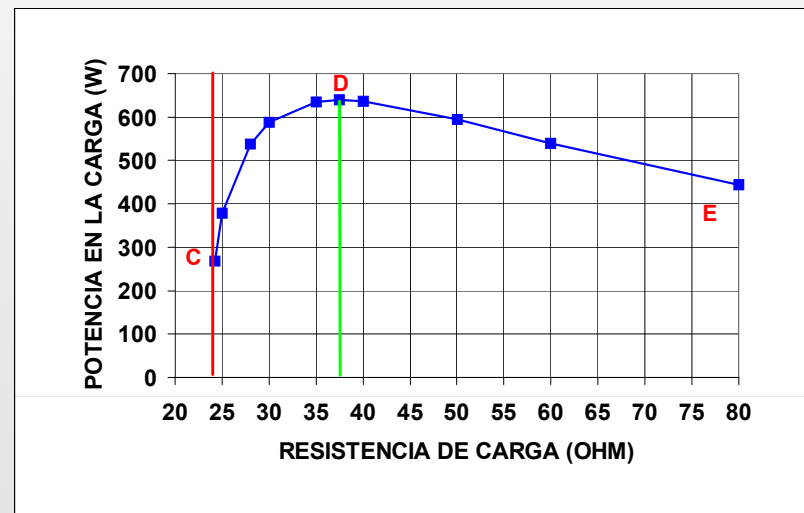
Todos los puntos de operación después de D hasta C resultan inestables ante eventuales incrementos en la carga y el generador se desexcitará.





## VI.3.2 CARACTERISTICA $R_c - P$

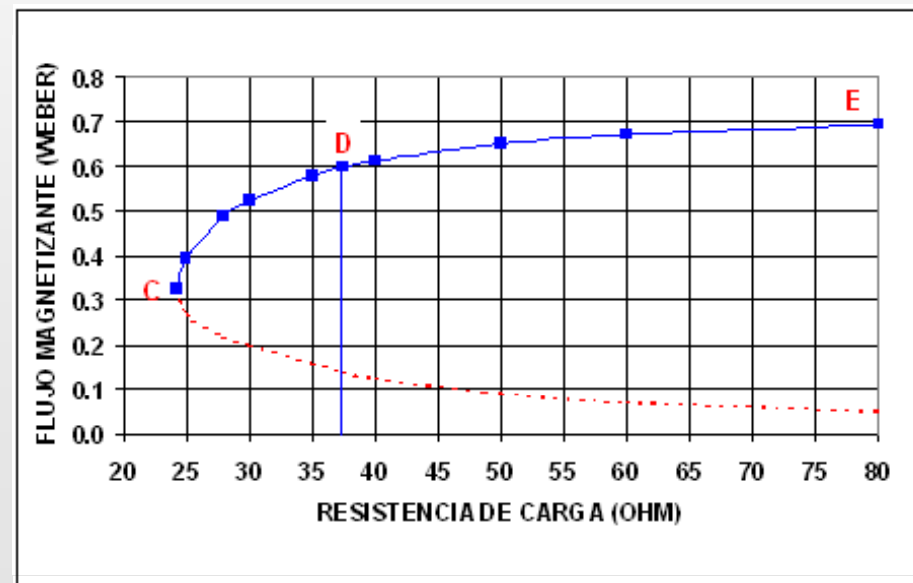
Al disminuir la resistencia de carga desde un punto de operación estable (E), la potencia en la carga se incrementa hasta alcanzar el máximo valor (D). Con una disminución adicional de la resistencia de carga la potencia disminuye.





### VI.3.3 CARACTERISTICA R c - Flujo Magnetizante

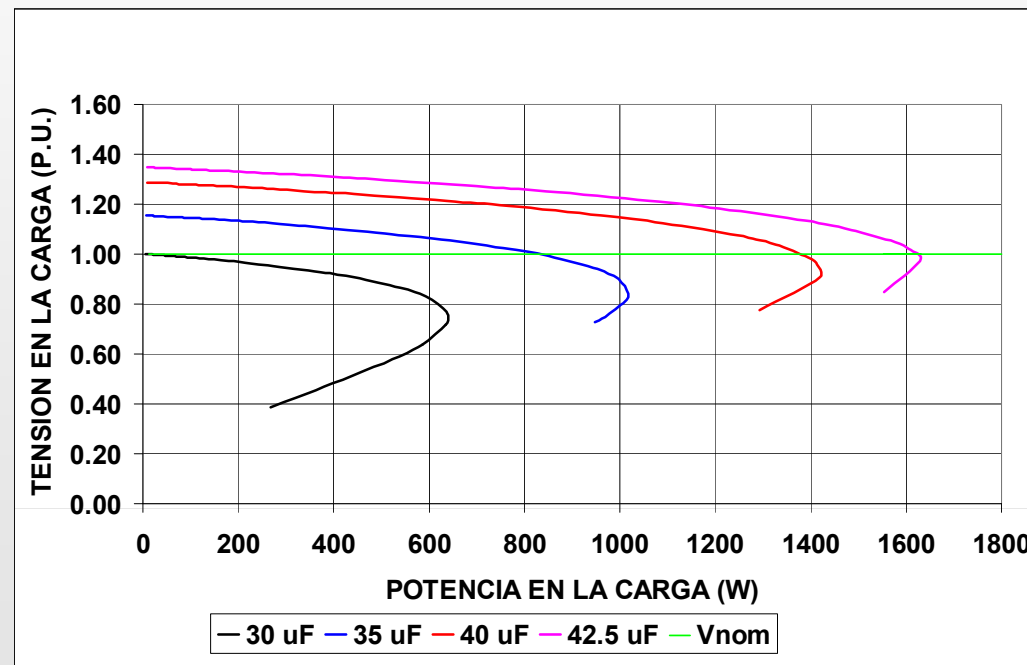
Para las condiciones de velocidad del rotor y capacitor shunt utilizadas se observa que existen puntos de equilibrio (estables e inestables) para resistencias de carga mayores al valor en C. Los punto de operación estables dan entre E y D.





## VI.3.4 ESTIMACION DE LA POTENCIA NOMINAL DEL GIADBE

Impulsado a 2700 rpm, se ha buscado el valor de  $C_{sh}$  con el cual se logre la condición de máxima potencia a la tensión de vacío.





### VI.3.5 DESVENTAJAS DEL GIADBE

En estado estacionario el GIADBE presenta las siguientes desventajas:

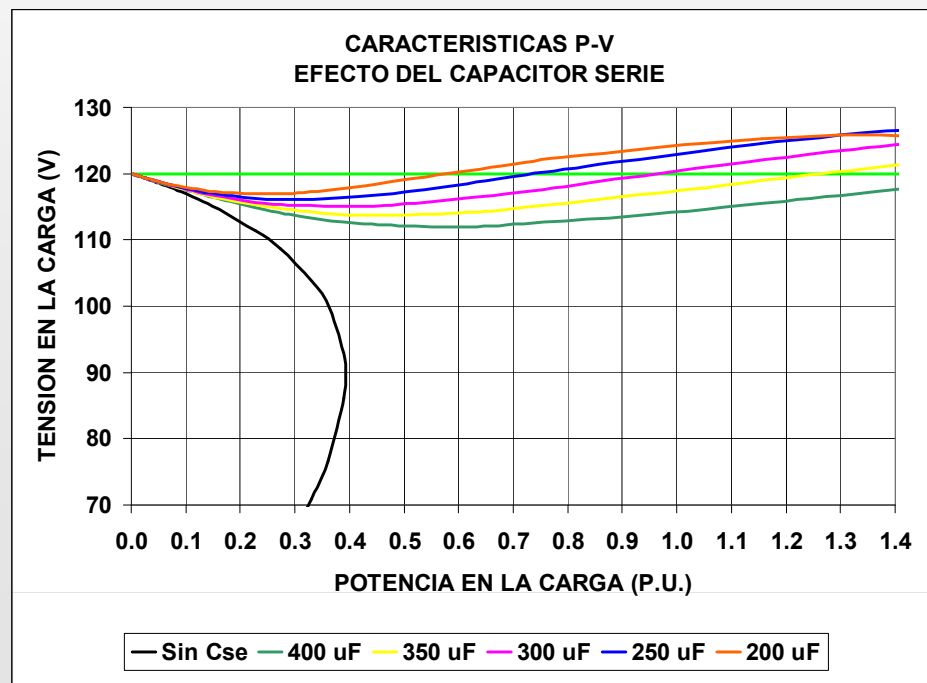
- (1) Pobre regulación de tensión. A la potencia máxima, la tensión resulta del orden del 75 % de la tensión de vacío. Esta inflexibilidad que impide aprovechar a plenitud la estructura magnética de la máquina y la capacidad de corriente de sus bobinados, es una característica que identifica a los generadores autoexcitados.
- (2) Desarrolla una potencia máxima. Si el generador es cargado por encima de este valor se ingresa a la zona inestable.



## VI.4 CARACTERISTICAS DEL GIABDECSE

### VI.4.1 CARACTERISTICA P - V

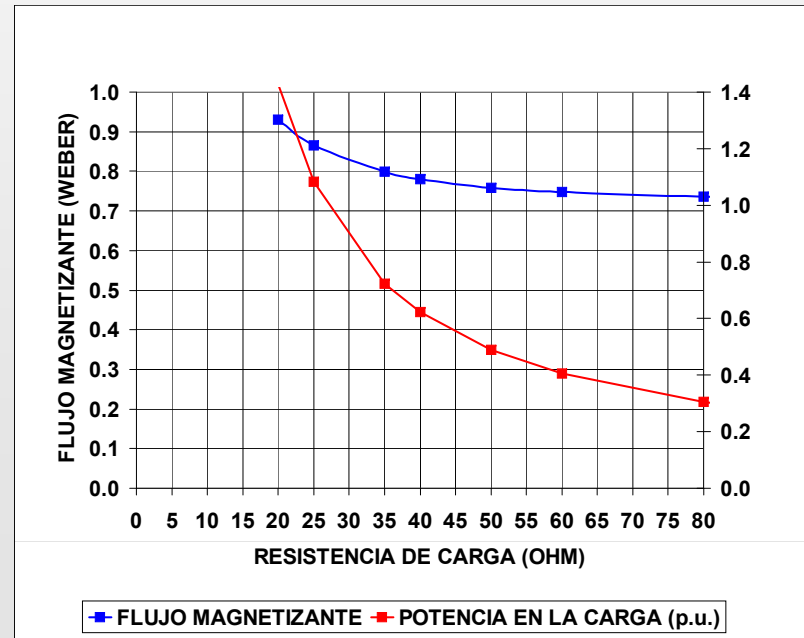
La máxima potencia del GIADBE implementado resulta 0.40 p.u.. Al instalar capacitores en serie con la carga se puede obtener potencias mayores y aprovechar plenamente la máquina de inducción utilizada.





## VI.4.2 CARACTERISTICAS R carga – Flujo Magnetizante

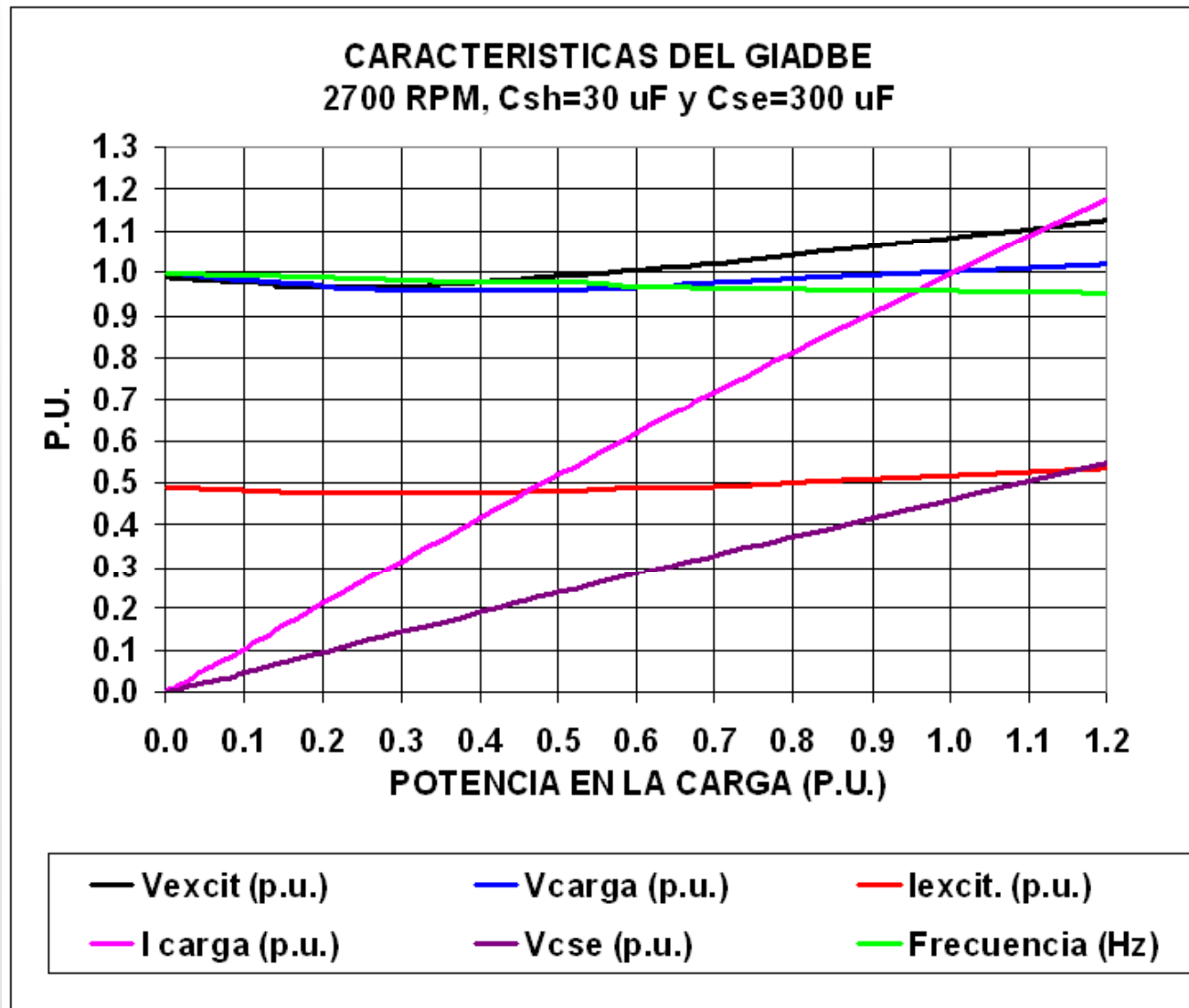
La zona de inestabilidad ha sido desplazada mas allá de la condición de operación a carga nominal de la maquina. Al disminuir la resistencia de carga el flujo magnetizante aumenta, han desaparecido las restricciones para la autoexcitación con carga.







## VI.4.3 CARACTERISTICAS DE OPERACIÓN





Con los capacitores serie se logra una apropiada regulación de tensión.

Ahora resulta atractivo cuando es comparado con un generador síncrono, ya que el alternador convencional, además de ser mucho más caro, requiere de un sistema de excitación y regulación de la tensión, que presenta gran complejidad al ser comparado con el esquema de regulación estudiado en el presente trabajo.



## VII. CONCLUSIONES

Los GIA con capacitores *shunt*, poseen inflexibilidades que le impiden competir con el generador síncrono: la pobre regulación de tensión y una inadecuada utilización de su potencia máxima disponible. Por esta razón, puede desexcitarse cuando es sobrecargado por encima del punto de máxima potencia o ante un cortocircuito en la carga. Al desexcitarse puede requerir la carga de los capacitores para la re-excitación.

Si se le añade capacitores en serie con la carga se logra una buena regulación de tensión y una apropiada utilización de la potencia máxima disponible. Estas inflexibilidades han sido superadas porque el capacitor serie compensa parte de la reactancia de dispersión del devanado de carga para cualquier condición de operación. Si se presenta un cortocircuito en la carga, el generador se sobreexcita y presenta una corriente de falla que puede ser detectada por la protección de sobrecorriente.



Los resultados de las simulaciones y otras que fueran requeridas, que pueden ser realizadas utilizando el modelo desarrollado en el presente trabajo, proveerán la información para predecir el comportamiento durante el diseño del generador, selección de los bancos de capacitores y obtener la información para la coordinación de las protecciones del generador.

Por lo tanto, el **Generador de Inducción Autoexcitado con Capacitores *shunt* y Autorregulado con Capacitores en Serie** con la carga, al tener un excelente comportamiento en estado estacionario con una adecuada respuesta transitoria se convierte en una alternativa simple, de bajo costo y autorregulada para sistemas de generación autónomos.